

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института-заместитель  
директора ФАКТ**

**М.А. Кудров**

|                            |  |
|----------------------------|--|
|                            | <b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>   |
| <b>по дисциплине:</b>      | Вихревые и отрывные течения                    |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика                 |
| <b>профиль подготовки:</b> | Авиационные технологии                         |
|                            | Физтех-школа авиационных и цифровых технологий |
|                            | кафедра аэрофизики и летательных аппаратов     |
| <b>курс:</b>               | 1  |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

1 (осенний) - Зачет

2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 60 час.

семинары: 0 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.М. Гайфуллин, д-р физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры аэрофизики и летательных аппаратов 04.03.2025

## Аннотация

Дисциплина "Вихревые и отрывные течения" направлена на обучение студентов основным понятиям, связанных с вихревым движением жидкости и газа, вывод уравнений эволюции различных вихревых течений, применение полученных знаний к конкретным вихревым и отрывным течениям. Методы исследования задач курса в основном аналитические.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

- обучение студентов основным понятиям, связанных с вихревым движением жидкости и газа, вывод уравнений эволюции различных вихревых течений, применение полученных знаний к конкретным вихревым и отрывным течениям. Методы исследования задач курса в основном аналитические.

#### Задачи дисциплины

- формирование у студентов базовых знаний в области вихревой гидродинамики;
- вывод уравнений эволюции различных вихревых течений;
- применение полученных знаний к конкретным вихревым и отрывным течениям.

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий  | УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации  |
|  | УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности |
|  | УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними  |
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук   | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности   |
|  | ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности  |
|  | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук   |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов  |
|  | ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов   |
|  | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования   |

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны знать:

- основные понятия гидродинамики;
- уравнения гидродинамики идеальной и вязкой жидкости;
- общие свойства течений идеальной жидкости;
- теорию плоских и пространственных безвихревых течений идеальной жидкости;
- вихревые движения идеальной жидкости;
- приближенные подходы к анализу вязких течений;
- турбулентное течение жидкости.

уметь:

- формулировать и решать краевые задачи для плоских и пространственных безвихревых и вихревых течений идеальной жидкости;
- формулировать и решать краевые задачи для течений вязкой жидкости;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

владеть:

- аналитическими методами исследования плоских и пространственных безвихревых и вихревых течений идеальной жидкости;
- методами исследования течений вязкой жидкости;
- математическим моделированием физических задач.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

| №           | Тема (раздел) дисциплины   | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|-------------|--|---|----------|-----------------|----------------|
|             |  | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1           | Основные понятия и соотношения для вязкой завихренной жидкости.  | 6   |          |                 | 3              |
| 2           | Основные понятия и соотношения для идеальной завихренной жидкости.   | 4   |          |                 | 3              |
| 3           | Возникновение и эволюция завихренности.  | 4   |          |                 | 3              |
| 4           | Плоские невязкие течения. Сход вихревой пелены с острой кромки.  | 8   |          |                 | 3              |
| 5           | Плоские вязкие течения. Точные решения.  | 4   |          |                 | 3              |
| 6           | Рециркуляционные течения. Решения Садовского и Лаврентьева – Шабата. Теорема Бэтчелора о постоянстве завихренности для стационарных течений. | 4   |          |                 |                |
| 7           | Нестационарная аналогия. Вихревое течение около крыла малого удлинения на малых углах атаки.   | 14  |          |                 | 10             |
| 8           | Отрывное течение около крыла большого удлинения. Теория плоских сечений. Неустойчивость Кроу.  | 10  |          |                 | 10             |
| 9           | Закрученные осесимметричные течения.   | 6   |          |                 | 10             |
| Итого часов |  | 60  |          |                 | 45             |

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| Подготовка к экзамену | 30 час.             |
| Общая трудоёмкость    | 135 час., 3 зач.ед. |

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

##### Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Основные понятия и соотношения для вязкой завихренной жидкости.

Определение поля скоростей по заданному полю завихренности. Поле скорости, индуцированное вихревой нитью. Поле скорости, индуцированное вихревой пеленой. Плоские течения.

##### 2. Основные понятия и соотношения для идеальной завихренной жидкости.

Перечисление основных понятий и соотношений для идеальной завихренной жидкости. Уравнение эволюции вихревой пелены.

##### 3. Возникновение и эволюция завихренности.

Возникновение и эволюция завихренности. Присоединенные и свободные вихри.

##### 4. Плоские невязкие течения. Сход вихревой пелены с острой кромки.

Сход вихревой пелены с гладкой поверхности. Автомодельные течения. Важные примеры автомодельных течений. О предельной форме автомодельного движения.

##### 5. Плоские вязкие течения. Точные решения.

Описание вязких течений и их характеристик. Точные решения. Автомодельные решения.

##### 6. Рециркуляционные течения. Решения Садовского и Лаврентьева – Шабата. Теорема Бэтчелора о постоянстве завихренности для стационарных течений.

Рециркуляционные течения. Решения Садовского и Лаврентьева – Шабата. Теорема Бэтчелора о постоянстве завихренности для стационарных течений. Обобщение теоремы Бэтчелора на нестационарный случай. Три вида автомодельного течения. Решение задачи об обтекании пластины с движущейся против потока поверхностью.

##### Семестр: 2 (Весенний)

##### 7. Нестационарная аналогия. Вихревое течение около крыла малого удлинения на малых углах атаки.

Нестационарная аналогия. Вихревое течение около крыла малого удлинения на малых углах атаки. Задача Кадена. Треугольное и прямоугольное крылья. Численные методы. Модель «вихрь-разрез». Потеря симметрии в отрывных течениях около тел малого удлинения.

##### 8. Отрывное течение около крыла большого удлинения. Теория плоских сечений. Неустойчивость Кроу.

Отрывное течение около крыла большого удлинения. Теория плоских сечений. Неустойчивость Кроу. Пространственная неустойчивость. Решение задачи о диффузии двух вихрей и о диффузии вихревого диполя. Раскрытие механизма диссипации циркуляции.

## 9. Закрученные осесимметричные течения.

Закрученные осесимметричные течения. Конические течения. Невязкое течение в ядре конической вихревой пелены. Вязкое течение в ядре конической вихревой пелены. Экспериментальные данные.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

учебная аудитория, доска, мел.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Введение в динамику жидкости [Текст] = An Introduction to Fluid Dynamics/Дж. Бэтчелор, -М, Мир, 1973

### Дополнительная литература

1. Вязкие течения с парадоксальными свойствами [Текст], монография/М. А. Гольдштик, В. Н. Штерн, Н. И. Яворский, -Новосибирск, Наука, 1989

## 7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)

Журналы по гидродинамике (Механика жидкости и газа, Прикладная математика и механика, Journal of Fluid Mechanics), доступные через Internet.

## 8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

## 9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)

Студент, изучающий дисциплину "Вихревые и отрывные течения", должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.

В результате изучения дисциплины студент должен знать основные определения, понятия, аксиомы.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы;
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- подготовку к зачету и экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

Важно добиться понимания изучаемого материала, а не механического его запоминания. При затруднении изучения отдельных тем, вопросов, следует обращаться за консультациями к лектору.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Авиационные технологии<br>Физтех-школа авиационных и цифровых технологий<br>кафедра аэрофизики и летательных аппаратов |
| <b>курс:</b>               | <u>1</u>   |
| <b>квалификация:</b>       | магистр  |

Семестры, формы промежуточной аттестации:

- 1 (осенний) - Зачет
- 2 (весенний) - Экзамен

**Разработчик:** А.М. Гайфуллин, д-р физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| УК-1 Способен осуществлять критический анализ проблемных ситуаций на основе системного подхода, вырабатывать стратегию действий  | УК-1.2 Осуществляет поиск вариантов решения поставленной проблемной ситуации на основе доступных источников информации  |
|  | УК-1.3 Разрабатывает стратегию достижения поставленной цели как последовательность шагов, предвидя результат каждого из них и оценивая их влияние на внешнее окружение планируемой деятельности и на взаимоотношения участников этой деятельности |
|  | УК-1.1 Анализирует проблемную ситуацию как систему, выявляя ее составляющие и связи между ними  |
| ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук   | ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности   |
|  | ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности  |
|  | ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук   |
| ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий | ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов  |
|  | ОПК-4.1 Способен применять знания и навыки по использованию информационно-коммуникационных технологий для поиска и изучения научной литературы, применения прикладных программных продуктов   |
|  | ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования   |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Вихревые и отрывные течения» обучающийся должен:

### знать:

- основные понятия гидродинамики;
- уравнения гидродинамики идеальной и вязкой жидкости;
- общие свойства течений идеальной жидкости;
- теорию плоских и пространственных безвихревых течений идеальной жидкости;
- вихревые движения идеальной жидкости;
- приближенные подходы к анализу вязких течений;
- турбулентное течение жидкости.

### уметь:

- формулировать и решать краевые задачи для плоских и пространственных безвихревых и вихревых течений идеальной жидкости;
- формулировать и решать краевые задачи для течений вязкой жидкости;
- эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- представить панораму универсальных методов и законов современного естествознания;
- абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций.

### владеть:

- аналитическими методами исследования плоских и пространственных безвихревых и вихревых течений идеальной жидкости;
- методами исследования течений вязкой жидкости;
- математическим моделированием физических задач.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

1. Рециркуляционные течения. Решения Садовского и Лаврентьева – Шабата.
2. Теорема Бэтчелора о постоянстве завихренности для стационарных течений.
3. Обобщение теоремы Бэтчелора на нестационарный случай.
4. Три вида автомодельного вязкого течения.
5. Решение задачи об обтекании пластины с движущейся против потока поверхностью.
6. Нестационарная аналогия.
7. Вихревое течение около крыла малого удлинения на малых углах атаки.
8. Задача Кадена.
9. Треугольное крыло. Характеристики течения.
10. Модель «вихрь-разрез». Потеря симметрии в отрывных течениях около тел малого удлинения .
11. Конические течения. Невязкое течение в ядре конической вихревой пелены.
12. Вязкое течение в ядре конической вихревой пелены. Экспериментальные данные.
13. Отрывное течение около крыла большого удлинения. Теория плоских сечений.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Примерные вопросы к зачету:

1. Рециркуляционные течения. Решения Садовского и Лаврентьева – Шабата.
2. Теорема Бэтчелора о постоянстве завихренности для стационарных течений.
3. Обобщение теоремы Бэтчелора на нестационарный случай.
4. Вихревое течение около крыла малого удлинения на малых углах атаки.
4. Задача Кадена.
6. Треугольное крыло. Характеристики течения.
7. Модель «вихрь-разрез». Потеря симметрии в отрывных течениях около тел малого удлинения .
8. Конические течения. Невязкое течение в ядре конической вихревой пелены.
9. Вязкое течение в ядре конической вихревой пелены. Экспериментальные данные.
10. Отрывное течение около крыла большого удлинения. Теория плоских сечений.

Список вопросов к экзамену:

1. Определение поля скоростей по заданному полю завихренности.
2. Поле скорости, индуцированное вихревой нитью.
3. Поле скорости, индуцированное вихревой пеленой.
4. Уравнение эволюции вихревой пелены.
5. Возникновение и эволюция завихренности. Присоединенные и свободные вихри.
6. Сход вихревой пелены с острой кромки. Характеристики течения.
7. Сход вихревой пелены с гладкой поверхности. Характеристики течения.
8. Автомодельные течения. Важные примеры автомодельных течений.
9. О предельной форме автомодельного движения.
10. Плоские вязкие течения. Точные решения. Автомодельные решения.

Билет 1

Неустойчивость Кроу. Пространственная неустойчивость.

Билет 2

Решение задачи о диффузии двух вихрей и о диффузии вихревого диполя. Раскрытие механизма диссипации циркуляции.



**Критерии оценивания**

Оценка отлично 10 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 9 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка отлично 8 баллов - выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.

Оценка хорошо 7 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка хорошо 6 баллов - выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка хорошо 5 баллов - выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка удовлетворительно 4 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка удовлетворительно 3 балла - выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка неудовлетворительно 2 балла - выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка неудовлетворительно 1 балл - выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

**5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Во время проведения зачета обучающиеся могут пользоваться программой дисциплины, а также справочной литературой, вычислительной техникой, конспектами лекций.

Зачет может проводиться по итогам текущей успеваемости и сдачи заданий, или путем организации специального опроса, проводимого в устной форме. Экзамен проводится путем организации специального опроса, проводимого в устной форме.